干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

新疆北部小时降雪特征及大暴雪天气影响系统研究

杨　涛[1,2]，　杨莲梅[1]，　周鸿奎[3]，　余行杰[2]，　李元鹏[2]
（1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐　830002；2. 新疆气候中心，新疆 乌鲁木齐　830002；
3. 新疆气象信息中心，新疆 乌鲁木齐　830002）

摘　要：新疆北部是我国降雪高频区之一，随着全球变暖降雪量呈显著增加趋势，对新疆气候产生重要影响，由于观测资料限制对该区域小时降雪研究还未开展，影响降雪精细化预报和服务能力提升。因此，利用新疆天山山区及其以北（以下称“新疆北部”）2012年11月—2021年2月50个国家气象站小时降雪观测资料，分析了冷季（11月—翌年2月）小时降雪特征，并按日降雪量从高到低挑选30个大暴雪过程分析其小时降雪特征、影响系统及典型环流配置。结果表明：（1）阿勒泰北部、塔城盆地、伊犁河谷为降雪小时数（SHN）高频区，可达200 $h\cdot a^{-1}$以上；天山山区SHN高频区为海拔1800~2000 m的中山带，达127.3 $h\cdot a^{-1}$，2000 m以上降雪很少。（2）北疆和天山山区小时降雪量（R）≤1.0 $mm\cdot h^{-1}$量级SHN占比分别为91.7%和91.9%，对降雪量贡献分别为70.7%和68.9%，R>1.0 $mm\cdot h^{-1}$为小时极端降雪事件，对北疆和天山山区降雪量贡献分别为29.3%和31.1%。（3）极端暴雪过程平均SHN为25.5 h，平均降雪量为30.7 mm，雪强约为1.2 $mm\cdot h^{-1}$，大暴雪过程由长时间降雪导致，降雪持续时间是开展大暴雪研究和进行预报服务的关键点，造成大暴雪过程的影响系统主要有中亚长波槽、中亚低涡、乌拉尔山长波槽和西西伯利亚低涡（槽），占比分别为30.0%、6.7%、13.3%和50.0%，中纬度长波槽（涡）和北方西西伯利亚低涡（槽）系统各为50.0%。

关 键 词：小时降雪；时空分布；大暴雪；影响系统；新疆北部
文章编号：

新疆北部是我国冬季降雪的高频区之一，随着全球增暖该区域的降雪量以及大雪、暴雪日数呈增加趋势[1-4]，冬季降雪与山区积雪、冰川积累密切联系，从而影响水资源变化和春、夏季融雪性洪水灾害的发生，从而对新疆的气候和生态环境产生重要影响。降雪还对交通、电力、通讯、建筑、农牧业等造成严重影响，且社会涉及面广、程度深，是政府和公众每年冬季最关心的天气气候事件，也是气象预报的难点和重点。随着经济社会发展进入新阶段，中国气象事业推动高质量发展，监测精密、预报精准、服务精细对新疆降雪精细化预报和服务提出更高要求，目前对小时降雪气候特征相关研究很少，降雪精细化预报和服务、区域数值模式检验和评估的科技支撑不足。

我国冬季降雪主要发生于青藏高原东部、新疆和东北区域，近几十年主要以日、月时间尺度的降雪观测资料，对我国各区域降雪气候特征开展了大量气候特征研究[1-10]，加深了我国降雪时空分布及不同量级降雪变化特征的认识。对新疆区域研究指出降雪具有显著空间分布差异和明显年际、年代变化，天山以北的阿勒泰地区、塔城盆地、伊犁河谷、天山北坡及中山带为降雪量高值区和大-暴雪高频区，20世纪80年代以来降雪量和极端降雪过程呈显著增多趋势[1,2,5]。暴雪是多尺度系统配置和动热力、水汽条件共同作用的结果[11-16]，低空急流、辐合线、切变线和中α尺度云团是暴雪的主要影响系统；冬季降水年际、年代际异常受高、中、低纬环流和水汽的共同影响[17-20]，斯堪的纳维亚环流型是造成新疆

收稿日期：2021-08-16；　**修订日期**：2021-12-02
基金项目：国家重点研发计划重点项目（2018YFC1507102）；中国科学院战略性先导科技专项（XDA20100306）资助
作者简介：杨涛（1969-），男，高级工程师，主要从事新疆天气气候研究. E-mail: yd_yang@sina.com
通讯作者：杨莲梅（1969-），女，博士，研究员，主要从事中亚天气气候研究. E-mail: yanglm@idm.cn

降雪异常的关键环流型，700 hPa偏西、西南地中海水汽输送是新疆降雪异常偏多的关键因素，已有研究加深了新疆区域冬季降雪分布特征和异常机理的认识。

我国降雪自动观测站从2010年开始大规模的陆续建设，目前小时降雪气候特征相关研究很少，仅有利用小时降雪资料分析伊犁河谷和乌鲁木齐降雪日变化特征[8,10]，伊犁河谷西部和中部降雪日变化呈单峰型，北京时间09:00—12:00为主要峰值时段，而对新疆北部区域小时降雪的量级、空间分布及随海拔变化等的精细化特征还未开展深入研究。2012年以来新疆北部50个国家气象站逐小时降雪观测资料规范完整，为新疆小时降雪气候特征研究提供了基础。本文利用新疆北部2012—2021年50个国家级气象站小时降雪观测数据，分析冷季（11月—翌年2月）小时降雪特征，揭示新疆北部小时降雪不同量级的精细化特征，以及大暴雪过程的小时降雪特征和相应的影响系统，可为精细化天气预报、区域数值模式检验和评估、水资源利用提供科学依据。

1　数据与方法

1.1　数据来源

新疆北部50个国家级地面气象观测站2012年11月—2021年2月逐日逐小时降雪自动观测数据来自于新疆气象信息中心，并进行了严格质量控制。本研究还利用日降水资料对各站极值做了对比检查，并结合值班记录对比分析，表明有2种小概率情况，一是降雪堆积在称重式雨量器承雪口并在某小时累积落入桶中，按观测规范记为此小时降雪，但实际是由前几个小时全部或部分累积而成；另一种情况是当时风速过大，风吹雪造成的吹雪和降雪共同计量。这2种情况小时降雪观测符合自动站观测规范，可以用于日累计值计算，但不能用于小时降雪及其极值分析，本文应用小时固态降水数据时经过严格质量控制。新疆气象业务降雪量级标准为[21]：12.1 mm≤24小时降雪量（R_{24}）<24.0 mm为暴雪，24.1 mm≤R_{24}<48.0 mm为大暴雪，R_{24}≥48.1 mm为特大暴雪。本文大暴雪过程按气象站日降雪量从高到低取前30个过程进行小时降雪特征分析和影响系统的研究。

1.2　研究方法

天山山脉以北北疆区域取44个气象站，天山山区取海拔高度≥1800 m气象站6个，包括大西沟（海拔3539 m）、巴音布鲁克（2458 m）、天池（1942 m）、白杨沟（1930 m）、小渠子（1871 m）和昭苏县（1851 m），新疆气象业务中天山山区代表站也为这6个站。11月—翌年2月为冷季，本文分析此阶段小时降雪特征和暴雪过程影响系统，某小时降雪量（R）≥0.1 mm表示该小时发生降雪，记为降雪小时数（SHN）。新疆冬季小时降雪观测从2012年才比较规范，对冬季小时降雪量级无研究和划分，本文基于研究发现R>1.0 mm比例很小，因此对R<0.7 mm按0.3 mm间隔进行分析，R>1.0 mm按0.5 mm间隔进行分析，划分为0.1~0.3 mm、0.4~0.6 mm、0.7~1.0 mm、1.1~1.5 mm、1.6~2.0 mm和≥2.1 mm共6个量级进行小时降雪气候特征分析。

2　结果与分析

2.1　冷季降雪小时数（SHN）空间分布

冬季年平均SHN分布（图1）可以看出，降雪高频中心在阿勒泰北部、塔城盆地、伊犁河谷，年平均SHN达200 h·a^{-1}以上，最大为塔城市（280.4 h·a^{-1}），其次为伊宁市（256.3 h·a^{-1}）。此外，年平均SHN高值区与地形密切相关，位于盆地与山区交界的山麓地带，北疆沿天山一带的个别地区乌苏市、乌鲁木齐市和奇台县的年平均SHN达150 h·a^{-1}以上，准噶尔盆地边缘为年平均SHN低值区，大多为40~100

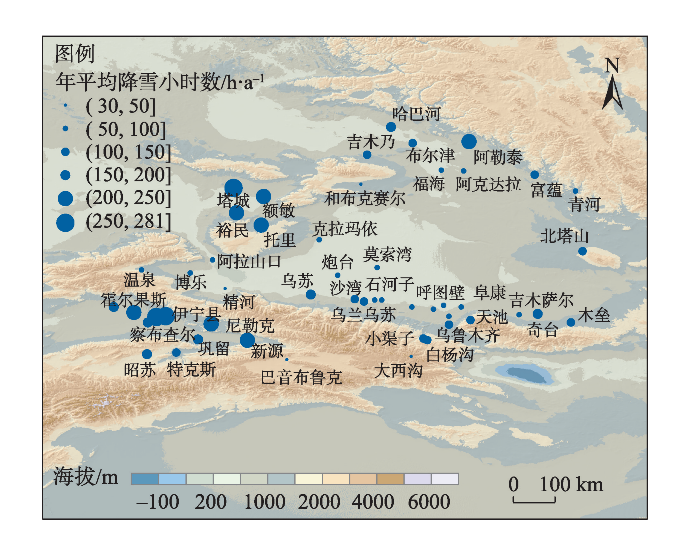


图1　新疆北部冷季年平均降雪小时数空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of annual average snowfall hourly numbers in cold season in northern Xinjiang

h·a^{-1}。由于冬季西西伯利亚地面冷高压稳定盘踞于西西伯利亚-蒙古高原地区，塔城盆地位于该冷高压的西南侧，中纬度地中海-里咸海-新疆北部出现西南暖湿气流与西西伯利亚地面冷高压交汇，造成塔城盆地发生暖区暴雪，加之塔城盆地特殊的向西开口的山盆地形，使得该区域是新疆暖区降雪发生的高频区[4,12,13,16]，这是塔城市年平均SHN最多的主要原因。天山山区的大西沟、巴音布鲁克、天池、白杨沟、小渠子和昭苏县的年平均SHN分别为32.9 h·a^{-1}、31.6 h·a^{-1}、121.3 h·a^{-1}、150.0 h·a^{-1}、109.6 h·a^{-1}和183.1 h·a^{-1}，可见天山山区降雪高频区为海拔1800~2000 m的中山带，2000 m以上降雪很少，冷季小时降雪分布具有较强的海拔地带性。

分析冷季小时降雪量最大值分布（图略），塔城盆地、伊犁河谷、北疆沿天山的精河县到石河子市一带及乌鲁木齐市小时最大雪强在4~5 mm·h^{-1}，其中塔城市、裕民县的小时雪强最大（分别达9.7 mm·h^{-1}和10.9 mm·h^{-1}），这与该区域发生暖区暴雪有关，造成暖区暴雪天气的水汽充足，降雪量较大，小时雪强也较大。新疆北部其他大部分站点都在2~4 mm·h^{-1}，可见冷季小时雪强远比夏季小时雨强小，夏季小时雨强最大值可达67.2 mm·h^{-1}[22]。

2.2　降雪小时数（SHN）和降雪量特征

北疆和天山山区年平均SHN分别为133.5 h·a^{-1}和104.8 h·a^{-1}（表1），年平均降雪量分别为65.1 mm·a^{-1}和46.7 mm·a^{-1}，可见北疆冬季小时降雪数和降雪量均大于天山山区，表明冬季北疆山麓地带降雪与天山山区都很重要，且降雪范围和降雪量相对大，而夏季天山山区降水大于北疆区域[22-25]，降水主要发生在山区、局地性强，可见新疆冬、夏季降水空间分布和小时降水气候特征有较大差异。

表1　新疆北部冷季年平均降雪小时数和降雪量

Tab. 1　Annual average snowfall hourly numbers and snowfall in cold season in northern Xinjiang

区域	年平均降雪小时数/h·a^{-1}	年平均降雪量/mm·a^{-1}
北疆	133.5	65.1
天山山区	104.8	46.7

由北疆和天山山区年平均SHN和降雪量的月分布（表2）可见，北疆年平均SHN呈逐月递减分布特征，11月最大为45.4 h·a^{-1}，12月为39.6 h·a^{-1}，1月和2月相当为30.6 h·a^{-1}和28.1 h·a^{-1}；天山山区11月年平均SHN最大为35.3 h·a^{-1}，12月和1月分别为23.2 h·a^{-1}和20.7 h·a^{-1}，2月最小为16.5 h·a^{-1}。前冬年平均SHN和降雪量多、后冬相对少，前冬冷空气活跃造成降雪时间和降雪量偏多，1月和2月冷空气强盛相对稳定控制新疆，只有当大尺度环流形势调整才造成新疆冬季降雪，各月降雪量分布与SHN分布特征一致，降雪量小于SHN，表明小时平均降雪量小于1 mm。

表2　新疆北部冷季逐月年平均降雪小时数和降雪量

Tab. 2　Annual average snowfall hourly numbers and snowfall of each month in cold season in northern Xinjiang

区域	指标	11月	12月	1月	2月
北疆	年平均降雪小时数/h·a^{-1}	45.4	39.6	30.6	28.1
	年平均降雪量/mm·a^{-1}	23.3	15.5	9.8	10.7
天山山区	年平均降雪小时数/h·a^{-1}	35.3	23.2	20.7	16.5
	年平均降雪量/mm·a^{-1}	20.0	9.9	4.8	8.8

2.3　小时降雪不同量级分布特征

由新疆北部6个分级小时降雪出现次数和降雪量特征（表3）可见，随着小时降雪量增大出现次数呈迅速减少分布特征，0.1 mm≤R≤0.3 mm量级年平均SHN最大为73.6 h·a^{-1}，占所有量级降雪的55.2%，

表3　新疆北部冷季小时降雪量分级特征

Tab. 3　Classification of hourly snowfall in cold season in northern Xinjiang

区域	降雪分级	0.1~0.3 mm	0.4~0.6 mm	0.7~1.0 mm	1.1~1.5 mm	1.6~2.0 mm	≥2.1 mm
北疆	年平均降雪小时数/h·a^{-1}	73.6	33.8	15.0	7.0	2.3	1.8
	百分比/%	55.2	25.3	11.2	5.3	1.8	1.2
	年平均降雪量/mm·a^{-1}	15.6	17.4	13.0	9.4	4.5	5.2
	百分比/%	24.0	26.7	20.0	14.4	6.9	8.0
天山山区	年平均降雪小时数/h·a^{-1}	62.6	23.5	10.3	5.1	1.8	1.4
	百分比/%	59.7	22.4	9.8	4.9	1.7	1.5
	年平均降雪量/mm·a^{-1}	12.0	11.6	8.5	6.6	3.2	4.7
	百分比/%	25.7	24.9	18.3	14.2	6.8	10.1

可见小时降雪以≤0.3 mm为主，表明新疆冬季小时雪量很小，但该分级降雪量对总降雪量贡献仅24.0%，表明该量级降雪对总降雪量的贡献远不及其出现时数；0.4 mm≤R≤0.6 mm量级年平均SHN为33.8 h·a^{-1}，占所有量级降雪的25.3%，对总降雪量贡献最多，为26.7%；0.7 mm≤R≤1.0 mm量级年平均SHN为15.0 h·a^{-1}，占所有量级降雪的11.2%，对总降雪量贡献为20.0%；1.1 mm≤R≤1.5 mm、1.6 mm≤R≤2.0 mm和R≥2.1 mm量级年平均SHN分别为7.0 h·a^{-1}（占所有量级降雪的5.3%）、2.3 h·a^{-1}（1.8%）和1.8 h·a^{-1}（1.2%），对总降雪量贡献分别为14.4%、6.9%和8.0%；R≤1.0 mm量级年平均SHN占比达到91.7%，对总降雪量贡献为70.7%，可见新疆冬季小时降雪以小量级为主，R>1.0 mm·h^{-1}降雪为小时极端降雪事件，对总降雪量贡献可达29.3%。

天山山区6个量级小时降雪的比例和对总降雪量贡献特征与北疆地区一致，未表现出山区降雪的区别，也是以R≤1.0 mm·h^{-1}量级降雪为主，R≤1.0 mm·h^{-1}量级年平均SHN占比达到91.9%，对总降雪量贡献为68.9%；R>1.0 mm·h^{-1}的极端降雪事件对总降雪量贡献可达31.1%。

分析小时降雪各分级频次分布（图略），R≤1.0 mm·h^{-1}的3个等级在伊犁河谷、塔城盆地、阿勒泰地区北部和乌苏-奇台的北疆沿天山一带为高频区；R>1.0 mm·h^{-1}的3个等级降雪，伊犁河谷始终是高频区，阿勒泰地区北部、塔城市和乌苏-奇台的北疆沿天山一带频次有所减少；R≥2.1 mm·h^{-1}量级年平均SHN伊犁河谷和乌苏-奇台的北疆沿天山一带为高频中心，表明该区域是小时极端降雪事件多发区。

由不同海拔高度6个量级小时降雪量的降雪小时数特征（表4）可见，不同海拔高度年平均SHN均以0.1~0.3 mm最多，为50.1~89.9 h·a^{-1}；不同海拔高度年平均SHN在500~1000 m和1800~2000 m为大值区，分别为159.8 h·a^{-1}和141.0 h·a^{-1}；海拔>2000 m区域年平均SHN最小，与该区域降雪量最少一致，表明高山区冷季降雪少。不同海拔高度年平均SHN随小时雪强增加出现时数迅速减少，尤其>1.0 mm·h^{-1}量级出现时数很少，表明该量级雪强为极端小时降雪事件。准东西向天山把新疆分为北部和南部两部分，最北部为西北-东南向阿尔泰山脉，天山西部为“Y”字形伊犁河谷，河谷中还有山，塔城盆地三面环山，准噶尔盆地位于天山和阿尔泰山之间，一系列高大山地、山间盆地和谷地构成了复杂的地形地貌，由此降雪差异性较大。总的讲降雪大值区位于山的迎风坡，由于地形对气流的阻挡使其被迫抬升而降温，易形成云而降雪，随坡向不同表现出降雪的差异；此外大气温度和零度层高度变化对降雪的影响也很大，也可能是形成2个最大降雪带的原因，需进一步结合地形、坡向和微物理过程开展相关研究。

2.4 大暴雪过程降雪小时特征和影响系统

2.4.1 大暴雪过程降雪小时特征和影响系统 2012—2020年新疆北部30个日降雪量最大的大暴雪过程代表站及其降雪量、大暴雪起止时间、降雪小时数、日降雪量、过程降雪量，以及相应大暴雪天气的影响系统见表5，大暴雪站起止时间中降雪会有间歇，故降雪小时数有小于起止时间数的情况。大暴雪过程SHN超过15 h以上的达80%，只有6次降雪过程SHN为8~14 h，大暴雪过程平均SHN为25.5 h，平均日降雪量为24.2 mm，达大暴雪量级，平均降雪量为30.7 mm，表明大暴雪雪强约为1.2 mm·h^{-1}，可见大暴雪发生降雪时间较长、雪强较大。降雪量最大的大暴雪过程出现在2016年11月11日16:00—13日03:00裕民县，过程降雪量为53.9 mm，SHN达36 h，平均小时雪强为1.5 mm·h^{-1}，最大小时雪强达5.5 mm·h^{-1}。SHN最大的大暴雪过程出现在2016年11

表4 不同海拔高度各降雪量等级年平均降雪小时数

Tab. 4 Annual average hourly snowfall numbers of each snowfall classification in difference altitude /h·a^{-1}

海拔高度/m	0.1~0.3 mm	0.4~0.6 mm	0.7~1.0 mm	1.1~1.5 mm	1.6~2.0 mm	≥2.1 mm	合计
<500	50.1	20.6	8.8	3.6	1.2	1.1	85.4
500~1000	84.7	41.3	19.1	9.3	3.1	2.3	159.8
1000~1500	73.7	32.8	12.2	5.4	1.9	1.4	127.4
1500~1800	89.9	19.1	10.0	4.9	0.5	0.3	124.7
1800~2000	84.8	30.3	13.8	7.5	2.5	2.1	141.0
>2000	18.3	9.9	3.2	0.4	0.4	0.1	32.3

表5 新疆北部30个站大暴雪天气过程降雪特征和影响系统

Tab. 5 Snowfall characteristics and influence systems of 30 heavy snowstorm processes in northern Xinjiang

站点	大暴雪起止时间	降雪小时数/h	日降雪量/mm	过程降雪量/mm	影响系统
裕民	2016年11月11日16:00—13日03:00	36	41.4	53.9	西西伯利亚低涡锋区与中纬度锋区汇合
乌鲁木齐	2015年12月10日14:00—12日09:00	37	35.9	46.3	乌拉尔山长波槽东移南下
伊宁县	2014年11月24日22:00—26日03:00	25	28.0	31.0	西西伯利亚低涡南压到咸海形成横槽
青河	2016年11月15日19:00—17日15:00	27	28.0	37.0	西西伯利亚低涡底部强锋区
天池	2016年11月04日17:00—05日17:00	24	27.9	38.8	中亚长波槽东移
米东	2015年12月10日21:00—12日04:00	29	27.4	31.4	乌拉尔山长波槽东移南下
富蕴	2016年11月11日19:00—12日18:00	23	25.2	28.1	西西伯利亚低涡锋区与中纬度锋区汇合
博乐	2015年11月02日05:00—17:00	13	25.1	25.1	中亚长波槽东移
伊宁市	2014年11月24日22:00—26日02:00	24	24.6	26.2	西西伯利亚低涡南压到咸海形成横槽
沙湾	2012年11月07日23:00—08日12:00	14	24.3	24.3	西西伯利亚低涡
塔城	2016年11月10日14:00—12日09:00	42	23.9	44.1	西西伯利亚低涡锋区与中纬度锋区汇合
伊宁县	2012年11月30日16:00—12月01日16:00	24	23.5	27.6	中亚长波槽东移
霍尔果斯	2015年11月02日02:00—09:00	8	23.5	23.5	中亚长波槽东移
乌鲁木齐	2016年11月04日18:00—05日16:00	22	23.5	30.6	中亚长波槽东移
霍尔果斯	2016年11月15日09:00—17日08:00	48	23.2	47.4	西西伯利亚低涡
白杨沟	2016年11月04日17:00—05日22:00	29	22.7	32.5	中亚长波槽东移
新源	2015年11月02日06:00—17:00	12	22.3	22.3	中亚长波槽东移
尼勒克	2016年11月12日03:00—13日14:00	32	22.2	33.6	西西伯利亚低涡锋区与中纬度锋区汇合
小渠子	2016年11月04日17:00—05日20:00	25	22.1	37.5	中亚长波槽东移
小渠子	2015年12月10日22:00—11日20:00	23	21.7	22.2	乌拉尔山长波槽东移南下
伊宁县	2018年11月11日21:00—13日10:00	32	21.6	25.4	西西伯利亚长波槽东移南下
伊宁市	2014年01月28日00:00—29日14:00	38	21.4	30.8	中亚低涡东移
伊宁市	2016年11月16日08:00—17日14:00	29	21.2	30.4	西西伯利亚低涡南移
伊宁县	2016年11月16日08:00—17日13:00	30	21.0	30.8	西西伯利亚低涡南移
伊宁市	2012年11月30日20:00—12月01日14:00	19	20.8	22.2	中亚长波槽东移
昌吉	2015年12月10日19:00—11日20:00	26	20.8	21.5	乌拉尔山长波槽东移南下
石河子	2012年11月07日23:00—08日10:00	12	20.7	20.7	西西伯利亚低涡南移
乌兰乌苏	2012年11月07日22:00—08日12:00	15	20.7	20.7	西西伯利亚低涡南移
霍尔果斯	2014年01月27日22:00—29日15:00	35	20.6	36.0	中亚低涡东移
新源	2017年11月04日20:00—05日07:00	12	20.5	20.5	西西伯利亚长波槽东移南下
	平均	25.5	24.2	30.7	

月15日09:00—17日08:00霍尔果斯市，SHN达48 h，过程降雪量达47.4 mm，但最大小时雪强仅为2.0 $mm\cdot h^{-1}$，此次过程由长时间降雪所致，雪强略小。SHN最小暴雪过程出现在2015年11月02日02:00—09:00霍尔果斯市，SHN仅为8 h，过程降雪量为23.5 mm，平均小时雪强达2.93 $mm\cdot h^{-1}$，其中4个时次小时雪强>3.0 $mm\cdot h^{-1}$，最大小时雪强为4.7 $mm\cdot h^{-1}$。

分析这30个大暴雪过程的569个小时降雪量，$0.1\leqslant R<1.0$ $mm\cdot h^{-1}$为252个（占比达44.2%），$1.0\leqslant R<2.0$ $mm\cdot h^{-1}$为200个（占比35.1%），$2.0\leqslant R<3.0$ $mm\cdot h^{-1}$为80个（占比14.2%），$3.0\leqslant R<4.0$ $mm\cdot h^{-1}$为25个（占比4.4%），$R\geqslant4.0$ $mm\cdot h^{-1}$为12个（占比2.1%），可以看出大暴雪过程小时降水强度<2.0 $mm\cdot h^{-1}$占79.3%，而≥2.0 $mm\cdot h^{-1}$仅占21.7%，表明长时间降雪导致大暴雪过程，新疆冷季暴雪过程主要抓住持续时间这个关键点进行研究、预报和服务。

分析造成这30个大暴雪过程的影响系统（表5）可见，主要由天气尺度的中亚长波槽、中亚低涡、乌拉尔山长波槽和西西伯利亚低涡（槽）造成，分别为9、2、4次和15次，其中西西伯利亚低涡（槽）影响方式主要有西西伯利亚长波槽、西西伯利亚低涡南压在新疆形成横槽、西西伯利亚低涡南压底部强锋

区、低涡南压底部强锋区与中纬度锋区汇合4种环流配置，表现为欧亚范围内环流经向度大、长波槽脊发展导致较强冷空气入侵新疆造成极端降雪过程，同时出现强锋区也是一个必要条件。

2.4.2 大暴雪天气过程典型环流形势 中亚长波槽、中亚低涡、乌拉尔山长波槽和西西伯利亚低涡造成大暴雪过程的典型环流配置如图2所示。图2a为中亚长波槽型环流配置，500 hPa高度、温度场上，欧亚范围中高纬度地区为两脊一槽的环流形势，中亚为长波槽，欧洲和贝加尔湖为强盛长波脊，发展强盛的欧洲高压脊不断引导新地岛强冷空气南下进入中亚长波槽，长波槽前为强西南气流，中亚长波槽发展加强并东移造成新疆北部大暴雪天气过程。同时，对流层低层的700 hPa存在一支里咸海-新疆北部的强劲西南急流，急流中心达24 $m \cdot s^{-1}$，该低空急流输送暖湿气流为降雪提供充足水汽。图2b为中亚低涡影响系统典型环流配置，500 hPa高度、温度场上，欧亚中高纬为欧洲脊和西西伯利亚槽的环流形势，低纬度伊朗高压脊发展强盛与欧洲东部脊叠加，形成20°~70°N强盛欧洲东部脊并向东北方向伸展，在脊前中亚地区形成切断低涡，中亚低涡中心温度<-40 ℃，低涡向东南移动造成新疆北部大暴雪天气。中亚低涡底部500 hPa风场存在一支风速>40 $m \cdot s^{-1}$的西南急流，同时700 hPa风场上，中亚低涡底部也有一支强劲的西南急流，风速>24 $m \cdot s^{-1}$，高、低空西南急流在新疆北部耦合发展，使得整层大气的垂直上升运动增强，为暴雪天气提供了有利的动力条件和水汽条件。图2c为乌拉尔山长波槽影响系统典型环流配置，500 hPa高度、温度场上，欧亚范围为三脊二槽经向环流，西欧、新疆东部和东亚为长波脊，乌拉尔山和贝加尔湖为长波槽，乌拉尔山长波槽前存在一支风速>40 $m \cdot s^{-1}$的偏西急流，乌拉尔山长波槽快速东移造成新疆北部大暴雪天气。同时，700 hPa里、咸海-新疆北部存在风速>24 $m \cdot s^{-1}$的低空西南急流，为大暴雪天气提供了有利的动力和水汽条件。图2d为西西伯利亚低涡影响系统典型环流配置，500 hPa高度、温度场上，欧亚范围为二槽一脊的经向环流，乌拉尔山为长波脊，西欧和西西伯利亚为宽广长波低槽，西西伯利亚形成切断低涡，冷涡中心温度<-44 ℃，新疆北部

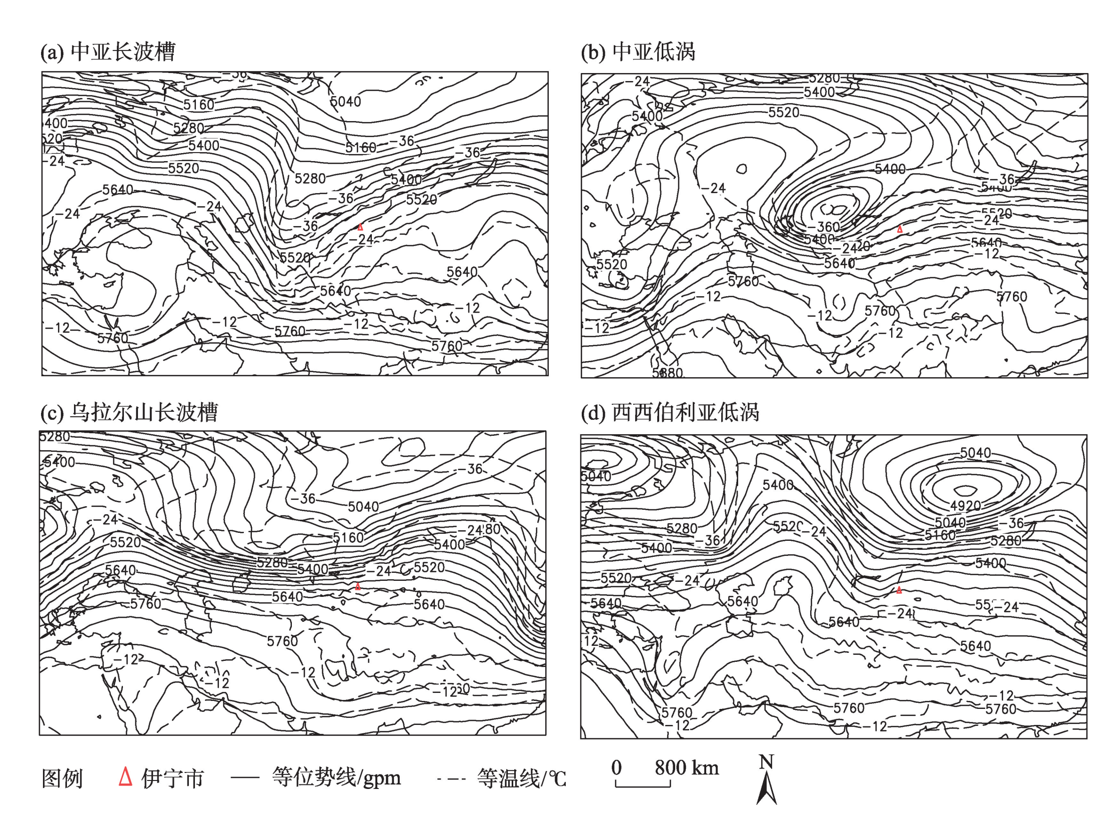


图2 新疆北部大暴雪天气500 hPa高度场和温度场典型环流配置

Fig. 2 Typical circulation configuration of 500 hPa height and temperature field of heavy snow weather in northern Xinjiang

处于极涡底部的强锋区中，强西西伯利亚低涡底部强锋区造成大暴雪天气。700 hPa中亚-新疆北部存在风速>16 m·s^{-1}的低空西风急流，为大暴雪天气提供了动力和水汽条件。

3　结论

利用2012年11月—2021年2月50个国家气象站小时降雪观测资料，分析了冷季（11月—翌年2月）小时降雪的空间分布、不同量级降雪和不同海拔高度不同量级降雪特征，并分析了30个大暴雪过程小时降雪、影响系统及典型环流配置，为降雪精细化预报、服务和研究提供一定科学依据。主要结论如下：

（1）北疆和天山山区年平均SHN分别为133.5 h·a^{-1}和104.8 h·a^{-1}，阿勒泰北部、塔城盆地、伊犁河谷为SHN高频区，可达200 h·a^{-1}以上，天山山区SHN高频区为海拔1800~2000 m的中山带，达127.3 h·a^{-1}，2000 m以上降雪很少。北疆和天山山区$R \leq 1.0$ mm·h^{-1}量级SHN占比分别为91.7%和91.9%，对降雪量贡献分别为70.7%和68.9%；$R > 1.0$ mm·h^{-1}降雪为小时极端降雪事件，但对降雪量贡献可达29.3%和31.1%。塔城盆地、伊犁河谷、北疆沿天山的精河-石河子一带及乌鲁木齐市小时最大雪强在4~5 mm·h^{-1}，其中塔城市、裕民县的小时雪强最大（分别达9.7 mm·h^{-1}和10.9 mm·h^{-1}），而新疆北部其他大部分站点都在2~4 mm·h^{-1}。

（2）大暴雪过程平均SHN为25.5 h，平均降雪量为30.7 mm，平均雪强约为1.2 mm·h^{-1}，对新疆大暴雪过程而言降雪持续时间是关键因素，是预报的着眼点。造成大暴雪过程的影响系统主要有中亚长波槽、中亚低涡、乌拉尔山长波槽和西西伯利亚低涡（槽），4种影响系统占比分别为30.0%、6.7%、13.3%和50.0%，欧亚范围内经向环流发展，长波槽脊发展导致较强冷空气入侵新疆造成大暴雪过程，同时500 hPa和700 hPa均出现伴随长波槽的急流，这是造成暴雪的必要条件。

新疆北部地形和下垫面复杂，由天山、阿尔泰山、塔城盆地和古尔班通古特沙漠，天山山系由许多走向各异的山地组成，在横向上为阶梯状山地，最显著地貌特征呈东西向展布的山地与盆地或谷地相间，在平面上似为一个巨大的不规则“X”形，其垂直地貌结构十分明显，从高到低主要分为极高山带、高山带、中山带和低山丘陵带，一系列高大山地、山间盆地和谷地构成了复杂的地形地貌。天气尺度系统是造成降雪的直接影响系统，降雪落区、量级与中尺度系统、地形、坡向、大气温度和零度层高度等有关，从而降雪表现出差异性，小时降雪的观测能为进一步研究降雪分布的精细化特征及与上述因素的关系提供良好基础，也是下一步需要开展的工作。

参考文献（References）

[1] 杨莲梅, 杨涛. 新疆大-暴雪过程气候特征及其水汽分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 389-396. [Yang Lianmei, Yang Tao. Analyses of the climate characteristics and water vapor of heavy snow in Xinjiang region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 389-396.]

[2] 刘玉莲, 任国玉, 于宏敏, 等. 我国强降雪气候特征及其变化[J]. 应用气象学报, 2013, 24(3): 304-313. [Liu Yulian, Ren Guoyu, Yu Hongmin, et al. Climatic characteristics of intense snowfall in China with its variation[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(3): 304-313.]

[3] 徐利岗, 周宏飞, 杜历, 等. 1951—2008年中国西北干旱区降水时空变化及其趋势[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 724-734. [Xu Ligang, Zhou Hongfei, Du Li, et al. Spatial-temporal change trend of precipitation in northwest China during 1951—2008[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3): 724-734.]

[4] 杨莲梅, 陈方, 丑士连, 等. 新疆暴雪年鉴(1953—2017)[M]. 北京: 气象出版社, 2018. [Yang Lianmei, Chen Fang, Chou Shilian, et al. Xinjiang heavy snowfall yearbooks[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2018.]

[5] 李岩瑛, 张强, 孙爱芝, 等. 祁连山及周边地区降雪气候特征研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(3): 383-391. [Li Yanying, Zhang Qiang, Sun Aizhi, et al. Climate characteristics of snowfall over the Qilian Mountain and its ambient areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(3): 383-391.]

[6] 井立红, 魏小亚, 高婧, 等. 近50 a新疆塔城地区冷季降水变化特征[J]. 干旱气象, 2012, 30(1): 39-44. [Jing Lihong, Wei Xiaoya, Gao Jing, et al. Analysis of cold season precipitation character in Tacheng in recent 50 years[J]. Journal of Arid Meteorology, 2012, 30(1): 39-44.]

[7] 蒋文轩, 假拉, 肖天贵, 等. 1971—2010年青藏高原冬季降雪气候变化及空间分布[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1211-1218. [Jiang Wenxuan, Jia La, Xiao Tiangui, et al. Climate change and spatial distribution of winter snowfall over the Tibetan Plateau during 1971—2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1211-1218.]

[8] 杨霞, 于晓晶, 赵雅蕾, 等. 2011—2015年乌鲁木齐冬季降雪的日变化特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(4): 603-609. [Yang Xia, Yu Xiaojing, Zhao Yalei, et al. Diurnal variation of winter snowfall in

Urumqi of Xinjiang from 2011 to 2015[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(4): 603-609.]

[9] 郑博华, 李斌, 黄秋霞, 等. 新疆伊犁河谷冷暖季降水时空分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 80-87. [Zheng Bohua, Li Bin, Huang Qiuxia, et al. Diurnal variation characteristics of precipitation in the cold and warm season of Ili River Valley, Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(3): 80-67.]

[10] 杨霞, 安大维, 周鸿奎, 等. 2012—2017年伊犁河谷冬季降水日变化特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 1033-1041. [Yang Xia, An Dawei, Zhou Hongkui, et al. Daily variation of winter precipitation in Ili River Valley of Xinjiang from 2012 to 2017[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 1033-1041.]

[11] 黄海波, 徐海容. 新疆一次秋季暴雪天气的诊断分析[J]. 高原气象, 2007, 26(3): 624-629. [Huang Haibo, Xu Hairong. Diagnostic analysis on a snowstorm event occurred of Xinjiang in fall[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(3): 624-629.]

[12] 赵俊荣, 杨雪, 杨景辉. 新疆北部冬季暖区大降雪过程中尺度云团特征分析[J]. 高原气象 2010, 29(5): 1280-1288. [Zhao Junrong, Yang Xue, Yang Jinghui. Analysis on mesoscale cloud characteristic of severe snowfall process in warm zone of northern Xinjiang winter[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(5): 1280-1288.]

[13] 陈涛, 崔彩霞. "2010. 1. 6"新疆北部特大暴雪过程中的锋面结构及降水机制[J]. 气象, 2012, 38(8): 921-931. [Chen Tao, Cui Caixia. The frontal structure and precipitation mechanism in the 6 January 2010 heavy snowfall event happening in north Xinjiang [J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(8): 921-931.]

[14] 赵俊荣, 杨雪, 蔺喜禄, 等. 一次致灾大暴雪的多尺度系统配置及落区分析[J]. 高原气象, 2013, 32(1): 201-210. [Zhao Junrong, Yang Xue, Lin Xilu, et al. Analysis on multi-scale system configuration and district of a disaster snowstorm[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(1): 201-210.]

[15] 张俊兰, 崔彩霞, 陈春艳. 北疆典型暴雪天气的水汽特征研究[J]. 高原气象, 2013, 32(4): 1115-1125. [Zhang Junlan, Cui Caixia, Chen Chunyan. Study on water vapor characteristic of typical heavy snowstorm case in northern Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(4): 1115-1125.]

[16] 刘晶, 李娜, 陈春艳. 新疆北部一次暖区暴雪过程锋面结构及中尺度云团分析[J]. 高原气象, 2018, 37(1): 158-166. [Liu Jing, Li Na, Chen Chunyan. The frontal structure and analysis on mesoscale cloud characteristic during a warm zone blizzard process in north Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(1): 158-166.]

[17] 杨莲梅, 史玉光, 汤浩. 新疆北部冬季降水异常成因分析[J]. 应用气象学报, 2010, 21(4): 491-499. [Yang Lianmei, Shi Yuguang, Tang Hao. Causes of winter precipitation anomalies in northern Xinjiang[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(4): 491-499.]

[18] 张书萍, 祝从文. 2009年冬季新疆北部持续性暴雪的环流特征及其成因分析[J]. 大气科学, 2011, 35(5): 833-846. [Zhang Shuping, Zhu Congwen. Possible causes of circulation anomalies associated with subsequent snowstorms over the north of Xinjiang during winter 2009[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35 (5): 833-846.]

[19] 杨莲梅, 刘雯. 新疆北部持续性暴雪过程成因分析[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 507-519. [Yang Lianmei, Liu Wen. Cause analysis of persistent heavy snow processes in the northern Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(2): 507-519.]

[20] 李亚云, 杨莲梅. 北疆冬季降水异常的环流特征和水汽输送分析[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(5): 465-474. [Li Yayun, Yang Lianmei. Analysis of circulation feature and water vapor transport of winter precipitation anomaly in northern Xinjiang[J]. Climate Change Research, 2018, 14(5): 465-474.]

[21] 肖开提·多莱特. 新疆降水量级标准的划分[J]. 新疆气象, 2005, 28(3): 7-8. [Duolaite Xiaokaiti. Formulation of precipitation intensity standard of Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang Meteorology, 2005, 28(3): 7-8.]

[22] 杨莲梅, 张云惠, 黄艳, 等. 新疆短时强降水诊断分析暨预报手册[M]. 北京: 气象出版社, 2020. [Yang Lianmei, Zhang Yunhui, Huang Yan, et al. Diagnostic analysis and forecast manual of short-time strong precipitation in Xinjiang[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2020.]

[23] 陈春艳, 赵克明, 阿不力米提江·阿布力克木, 等. 暖湿背景下新疆逐时降水变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 692-702. [Chen Chunyan, Zhao Keming, Ablikim Ablimitijan, et al. Temporal and spatial distributions of hourly rain intensity under the warm background in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 692-702.]

[24] 秦贺, 陈春艳, 阿不力米提江·阿布力克木, 等. 新疆暖季短时强降水特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1440-1449. [Qin He, Chen Chunyan, Ablikim Ablimitijan, et al. Characteristics of short-duration heavy rainfall in warm season in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1440-1449.]

[25] 杨霞, 周鸿奎, 赵克明, 等. 1991—2018年新疆夏季小时极端强降水特征[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 762-773. [Yang Xia, Zhou Hongkui, Zhao Keming, et al. Variation features of hourly precipitation in Xinjiang Province during 1991—2018[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(4): 762-773.]

Hourly snowfall characteristics and influence system of heavy snowstorm in northern Xinjiang

YANG Tao[1,2], YANG Lianmei[1], ZHOU Hongkui[3], YU Xingjie[2], LI Yuanpeng[2]

(1. Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Climate Centre, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Meteorological Information Centre, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Northern Xinjiang has been identified as one of China's snowiest regions. Snowfall has significantly increased as a result of global warming, having a substantial impact on the climate in Xinjiang. Due to the limitation of observation data, no research on hourly snowfall has been conducted in this area, affecting the improvement of snowfall fine forecasting and service ability. The hourly snowfall characteristics in the cold season (November to February next year) are analyzed using data from 50 national meteorological stations in the Tianshan Mountains area of Xinjiang and its north (northern Xinjiang) from November 2012 to February 2021. Thirty heavy snowstorm processes are selected according to their snowfall amount and the daily snowfall amount for analysis of their hourly snowfall characteristics, impact systems, and typical circulation configuration. The results show the following: (1) Northern Altay Prefecture, the Tacheng Basin, and the Ili River Valley have a high snowfall hourly number (SHN), which can exceed 200 $h \cdot a^{-1}$. Tianshan Mountains' high-frequency area is the middle mountain belt, with an altitude of 1800–2000 m, and the SHN is 127.3 $h \cdot a^{-1}$. There is little snow above 2000 m. (2) In northern Xinjiang and the Tianshan Mountains, the proportion of SHN in the order of $R \leqslant 1.0$ $mm \cdot h^{-1}$ is 91.7% and 91.9%, respectively, and its contribution to snowfall is 70.7% and 68.9% respectively. $R > 1.0$ $mm \cdot h^{-1}$ is an hourly extreme snowfall event, yet it contributes 29.3% and 31.1% of the snowfall in the northern Xinjiang and Tianshan Mountains, respectively. (3) The average SHN and snowfall of the heavy snowfall process are 25.5 h and 30.7 mm, respectively, with a snowfall intensity of 1.2 $mm \cdot h^{-1}$. Heavy snowfall processes are caused by prolonged snowfall, and snowfall duration is key for heavy snowfall process research, forecasting, and service. Among the Central Asia trough systems, the Central Asia vortex, the Ural Mountain trough, and the West Siberian vortex (trough) system account for 30.0%, 6.7%, 13.3%, and 50.0%, respectively, while the middle latitude long wave trough (vortex) and West Siberian vortex (trough) systems account for 50.0%.

Key words: hourly snowfall; spatial-temporal distribution; heavy snowstorm; influence system; northern Xinjiang